

DOI: 10.11779/CJGE2019S2041

长期循环荷载下珊瑚砂累积变形特性试验研究

何绍衡¹, 刘志军², 夏唐代¹, 周红星², 于丙琪¹

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要: 对取自南海的珊瑚砂进行等向和 K_0 固结的三轴排水剪切试验, 发现固结路径对珊瑚砂的剪切行为有显著影响。在此基础上, 采用 K_0 固结条件, 设计一系列不同围压和循环动应力比的长期排水循环加载三轴试验, 研究得到珊瑚砂具有门槛颗粒破碎循环动应力比, 安定性理论可用于解释不同动应力比长期循环加载下珊瑚砂的累积变形发展模式。基于静力和动力试验结果, 引入相对偏应力水平, 建立能反映初始固结状态和循环动应力比的珊瑚砂排水循环加载轴向残余累积应变显式计算模型, 对预测循环荷载下珊瑚砂地基长期沉降有积极意义。

关键词: 珊瑚砂; 长期循环荷载; 累积变形特性; 显式计算模型

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S2-0161-04

作者简介: 何绍衡(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事珊瑚砂静动力特性方面的研究。E-mail: heshaocheng@zju.edu.cn。

Experimental study on cumulative deformation characteristics of coral sand under long-term cyclic loading

HE Shao-heng¹, LIU Zhi-jun², XIA Tang-dai¹, ZHOU Hong-xing², YU Bing-qi¹

(1. Research Center of Costal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China)

Abstract: The drained triaxial shear tests on isotropic and K_0 consolidation of coral sand samples taken from the South China Sea reveal that the consolidation path has a significant effect on the strength characteristics of the coral sand. On this basis, using the K_0 consolidation condition, a series of long-term drained cycle triaxial tests with different confining pressures and cyclic dynamic stress ratios are carried out. The results show that the coral sand has a threshold cyclic dynamic stress ratio, which makes its particles obviously broken. The stability theory can be used to explain the cumulative deformation development patterns of the coral sand under long-term cyclic loading with different dynamic stress ratios. Based on the results of static and dynamic test results, the relative deviator stress level is introduced to establish an explicit model for the axial residual cumulative deformation of the coral sand, which can reflect the initial consolidation state and cyclic dynamic stress ratio of the coral sand under drained cyclic loading. The proposed model is of positive significance for predicting the long-term settlement of the coral sand foundation under cyclic loading.

Key words: coral sand; long-term cyclic loading; cumulative deformation characteristic; explicit model

0 引言

目前南海许多工程中都采用珊瑚砂作为回填料, 在特殊的海洋环境和人工活动影响下, 吹填珊瑚砂地基长期承受着交通荷载和波浪荷载等循环动载, 珊瑚砂的性质不同于陆源石英砂^[1], 因此, 珊瑚砂地基正面临着更为复杂和难以预测的地表沉降变形问题。

Hardin^[2]从能量的角度定量分析颗粒破碎, 提出了相对破碎率 B_r 。现阶段, 对于珊瑚砂在循环荷载下的动力特性的研究比较有限。王刚等^[1]和 Sadrekarimi 等^[3]对珊瑚砂进行了三轴排水循环加载试验, 研究表明颗粒破碎程度随着循环次数的增加而增大, 但上述研究选取循环加载次数最多为 500 次, 不能反映珊瑚砂

长期动力响应。此外, 上述研究砂样均采用等向固结^[1,3], 忽略了天然 K_0 固结过程, 因此上述研究不足以反映循环荷载下珊瑚砂真实的动力特性。目前, 国内外对珊瑚砂长期动力特性的研究极为匮乏。

本文对取自南海的珊瑚砂进行等向和 K_0 固结的三轴排水剪切试验; 采用 K_0 固结条件, 设计一系列不同围压和循环动应力比的长期排水循环加载三轴试验, 基于静力和动力试验结果, 建立能反映初始固结

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208294, 51378463); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018QNA4033)

收稿日期: 2019-04-28

*通讯作者(E-mail: heshaocheng@zju.edu.cn)

状态和循环动应力比的珊瑚砂循环残余累积应变显式计算模型, 对预测珊瑚砂地基长期沉降有积极意义。

1 试验材料和试验方案

砂样为取自我国南海西沙群岛某岛礁的珊瑚砂, 该砂样的颗粒相对密度 G_s 为 2.75, 最大孔隙比 e_{\max} 为 1.11, 最小孔隙比 e_{\min} 为 0.75, 级配曲线见图 1。试验采用 GDS 动三轴仪。试样的直径和高度分别为 50, 100 mm, 密实度为 70%。本次研究参照文献[3, 4]对珊瑚砂依次进行抽真空、通 CO₂、分级反压饱和步骤, 直到用 sketpmmon 检测法^[5], 检测 $B > 0.95$ 时完成饱和操作。本文动荷载波形采用半正弦波模拟交通荷载的单向脉冲振动^[4], 频率参照王刚等^[1], 取为 0.1 Hz。由于在长期交通荷载下珊瑚砂的动力响应为排水工况, 试验采用排水条件。为研究长期循环荷载下珊瑚砂累积变形, 试验振动次数 N 为 20000 次, 时长 t 为 200000 s, 选取围压 σ_c 分别为 100, 200, 300 kPa, 每种 σ_c 下选取循环动应力比 γ_d ($\gamma_d = q_d / \sigma_c$, 其中 q_d 为动偏应力幅值, σ_c 为有效围压) 为 0.2, 0.4, 0.6, 在试验结束后回收试样并进行筛分。已有珊瑚砂动三轴试验多采用等向固结^[1, 3], 而实际珊瑚砂是处于 K_0 状态, 本文设置有效围压为 100, 200, 300 kPa, 对珊瑚砂进行等向和 K_0 固结的 CD 剪切试验, 试验中 CD 剪切速率分别取为 0.045 mm/min。

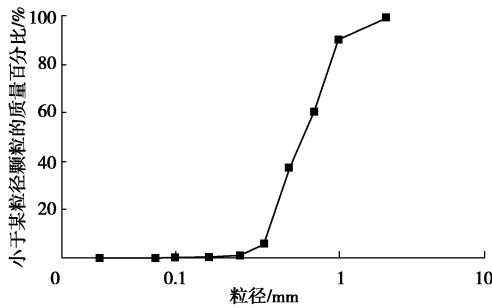


图 1 珊瑚砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-siz distribution curve of coral sand

2 试验结果分析

2.1 等向和 K_0 固结三轴强度变形特性

图 2 为等向和 K_0 固结 CD 试验的应力 - 应变关系, 可以看出, 等向和 K_0 固结珊瑚砂 CD 试验的应力 - 应变曲线皆呈应变软化型, 体应变的变化趋势为先剪缩后剪胀, 且随着有效围压增大体应变剪胀减小而逐渐向剪缩过渡, 这与前人研究珊瑚砂剪切特性的试验规律是一致的^[1]。值得注意的是由图 2 中可以看出, 等向和 K_0 固结的 CD 剪切应力 - 应变及体应变特性有显著差异, 等向固结的试样峰值强度大于 K_0 固结试

样, K_0 固结的试样的剪胀性明显大于等向固结试样。综上所述, 固结路径对珊瑚砂剪切行为有重要影响, 忽视实际 K_0 固结路径将会使试验结果与实际情况有偏差。

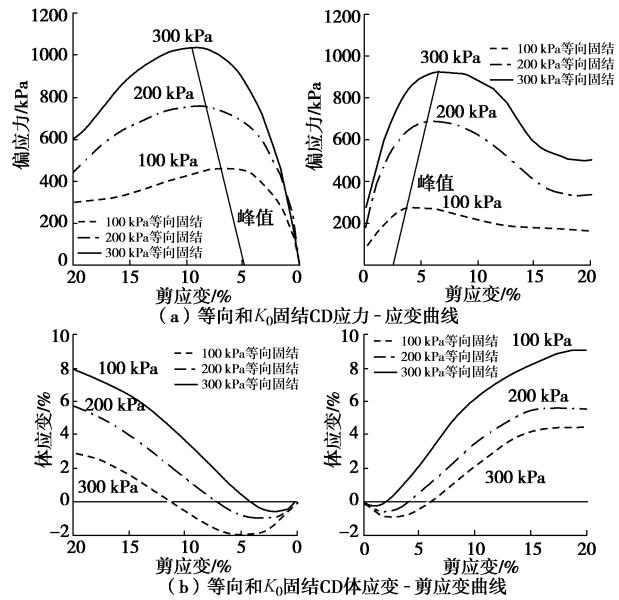


图 2 等向和 K_0 固结 CD 试验曲线对比

Fig. 2 Comparison of CD tests of isotropic and K_0 consolidation samples

2.2 循环加载试验结果分析

图 3 为珊瑚砂循环加载下累积应变和滞回圈的发展模式 ($\sigma_c = 300$ kPa, $\gamma_d = 0.6$ 、 $t = 1000$ s 时为例), 可以看出, 残余应变呈破浪式上升, 随着循环次数的增加, 残余应变累积的速率不断减小并趋于平稳, 残余应变在文中表示为 ε_p ; 最开始的几次循环加载滞回圈是不闭合的, 随着循环次数增加, 塑性变形产生的速度减缓, 滞回圈逐渐闭合。图 4 为循环加载后的相对破碎率 B_r , 可以看出, 当 γ_d 较小时, 试样的相对颗粒破碎率较小, 且存在台阶, 这表明珊瑚砂具有使颗粒发生明显破碎的门槛循环应力比。图 5 不同动应力比下累积应变速率发展为 ($\sigma_c = 300$ kPa 为例), 可以看出, 不同 γ_d 下的变形发展模式可由安定理论^[6]解释, 当 γ_d 较小时, 珊瑚砂除刚开始加载排水产生一定的瞬时塑性应变外, 后期只有微小的塑性应变, 属于纯弹性行为。随着 γ_d 增加, 珊瑚砂在加载排水稳定后, 开始有一定的塑性应变累积, 但累积速率在有限个振动次数内逐渐降低, 土体累积应变也因此达到稳定, 属于弹性和塑性安定行为。

2.3 循环累积变形显式模型

姚兆明等^[7]提出考虑初始静偏应力、循环动偏应力和峰值循环动偏应力水平影响的循环累积应变模型, 之后王磊^[4]基于此模型建立了福建标准砂累积应

变预测模型, 该模型表达式为

$$\lg\left(\frac{\varepsilon_N}{\varepsilon_1}\right) = b \lg N \quad , \quad (1)$$

式中, 第1次循环加载累积应变包含了初始固结状态、循环动应力水平的影响, 而对于珊瑚砂第1次循环加载在排水条件下的瞬时变形较大且受其他因素干扰, 不能全面反映初始状态, 因此, 本文对模型进行了修正, 为排除其他因素影响, 采用前50次循环加载累积应变 ε_{50}^p 表征初始固结状态和循环动应力的影响。

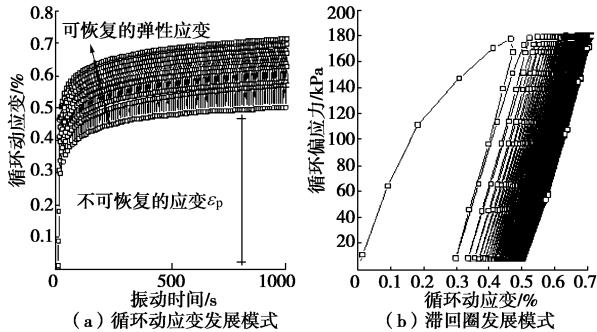


图3 珊瑚砂排水循环加载累积应变和滞回圈发展模式

Fig. 3 Cumulative strains and hysteresis loop development model of drained cycle triaxial tests on coral sand

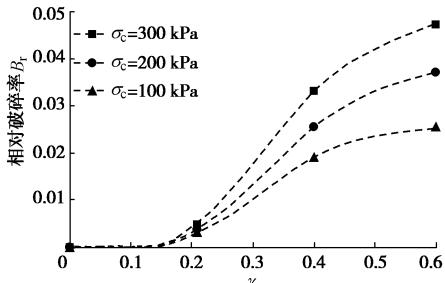


图4 循环加载后的相对破碎率

Fig. 4 Relative breakage rate after cyclic loading

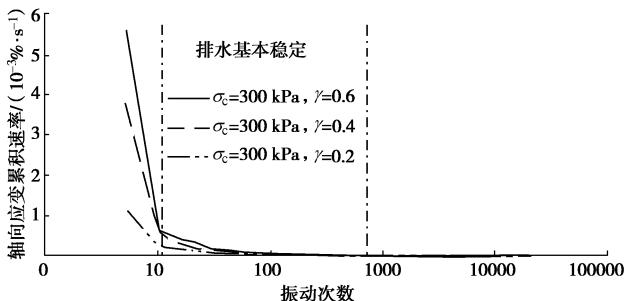


图5 不同动应力比下累积应变速率发展

Fig. 5 Development of cumulative strain rates under different dynamic stress ratios

图6为循环累积应变比和振动次数的双对数关系, 可以看出, 累积应变比与振动次数在双对数坐标下为线性关系, 因此, 考虑初始固结状态和循环动应力的累积应变比和加载次数的关系可以唯一确定。通过拟合得到累积应变比和振动次数曲线的斜率 b 为0.058。

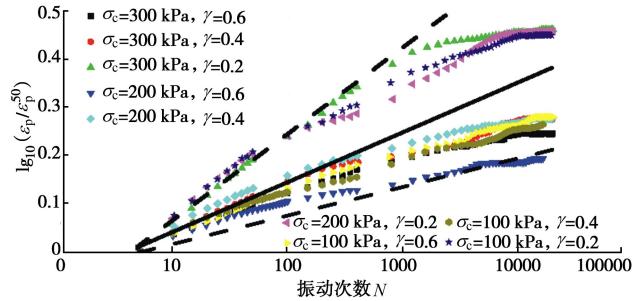


图6 循环累积应变比与振动次数的双对数关系

Fig. 6 Logarithmic relationship between axial cumulative strain and vibration times

图7(a)为 ε_{50}^p 与 p/p_a 的关系, 可以看出, 在一定围压范围内, ε_{50}^p 与 p/p_a 呈幂函数关系:

$$\varepsilon_{50}^p = A(\gamma_s, \gamma_d) \left(\frac{p}{p_a} \right)^c \quad . \quad (2)$$

式中 A 为与初始固结静应力比 γ_s 、动应力比 γ_d 相关的函数; P_a 为 101 kPa; c 为模型参数, 通过拟合得到 c 平均值为 0.4296, 图7(b)为 ε_{50}^p 与 $(p/p_a)^{0.4296}$ 的关系, 可以看出, ε_{50}^p 与 $(p/p_a)^{0.4296}$ 为线性关系。

为了对循环加载过程中的应力路径进行描述, 黄茂松等^[7]提出了相对偏应力水平概念, 其表达式如下:

$$D^* = \frac{D_p - D_s}{D_{max} - D_s} \quad , \quad (3)$$

式中 D^* 为相对偏应力水平, D_p 为峰值偏应力水平, $D_p = (q_d + q_s)/q_{ult}$; D_s 为静偏应力水平, $D_s = q_s/q_{ult}$; q_d 为动偏应力幅值, q_s 为静偏应力幅值, q_{ult} 为静强度, D_{max} 为可能达到的峰值偏应力水平, 即为 1。

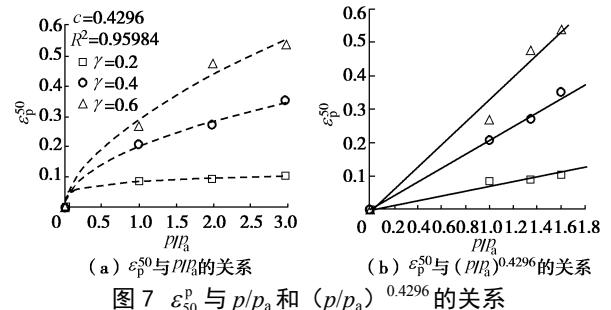


图7 ε_{50}^p 与 p/p_a 和 $(p/p_a)^{0.4296}$ 的关系

Fig. 7 Relationship among ε_{50}^p and p/p_a and $(p/p_a)^{0.4296}$

相对偏应力水平 D^* 中包含初始固结状态的静偏应力水平和循环加载过程中的动偏应力水平, 因此, 可以作为珊瑚砂长期循环累积应变模型的参数之一来反映初始固结状态和循环动应力比的影响。

由于 ε_{50}^p 与 $(p/p_a)^{0.4296}$ 基本呈线性关系。因此利用 $(p/p_a)^{0.4296}$ 对 ε_{50}^p 归一化即可得 A 值, 将初始静平均应力比 p/p_a 对前50次轴向累积应变的影响消除, 只剩下动循环应力比、初始静偏应力比对 ε_{50}^p 的影响, 这样即可以研究 D^* 与 ε_{50}^p 和 $(p/p_a)^{0.4296}$ 的归一化 A 值之间的关系。图8为 D^* 与 A 的关系, 可以看出 D^* 与 A 之间呈指数规律。基于上述分析, 得到循环累积应变

与振动次数的双对数线性关系, 得到前 50 次轴向循环累积应变与初始平均应力比 p/p_a 的幂函数关系, 引入黄茂松等^[7]提出的相对偏应力水平 D^* , 建立了饱和珊瑚砂长期循环荷载下累积应变的显式预测模型:

$$\varepsilon_a = a(D^*)^m \left(\frac{p}{p_a} \right)^c N^b , \quad (4)$$

式中, a , m 反映 D^* 对前 50 次循环累积应变与 p/p_a 归一化值 A 的影响; c 反映了初始平均应力比 p/p_a 对 ε_{50}^p 的影响, 由不同 p/p_a 但相同动应力比的 ε_{50}^p 与 p/p_a 通过指数拟合得到; b 反映振动次数对累积应变的影响, 由累积应变比与加载次的双对数曲线线性拟合得到。与其它循环累积变形显式计算模型相比, 该模型物理意义明确, 计算参数较少且考虑影响因素较为全面。

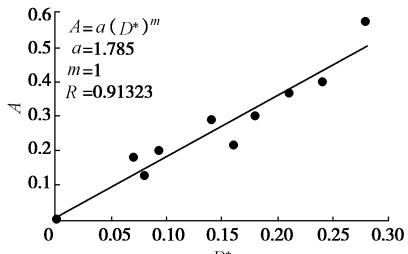


图 8 D^* 与 A 的关系

Fig. 8 Relationship between D^* and A

珊瑚砂循环累积应变实测值和模型预测值见图 9, 图中实线为预测值, 可以看出, 模型预测规律与试验结果吻合较好, 说明显示计算模型具有合理性。

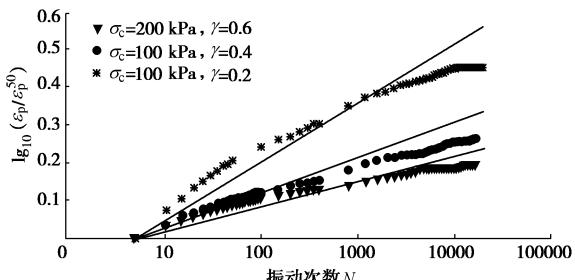


图 9 模型结果与试验结果的验证

Fig. 9 Verification of model and test results

3 结 论

(1) 固结路径对珊瑚砂的剪切行为有显著影响, K_0 固结下的珊瑚砂较等向固结下的珊瑚砂强度降低而剪胀性增强, 建议工程中考虑珊瑚砂实际固结路径。

(2) 珊瑚砂具有门槛颗粒破碎循环动应力比。当循环动应力比 γ_d 较小时, 珊瑚砂颗粒破碎较少, 试样在排水循环加载稳定后只产生微小的塑性应变, 当 γ_d 较大时, 试验在排水循环加载稳定后产生一定塑性应变累积, 安定性理论可用于解释不同动应力比长期循环加载下珊瑚砂的累积变形发展模式。

(3) 通过前 50 次轴向循环累积应变与围压归一化及引入相对偏应力水平, 建立能反映初始固结状态和循环动应力比的珊瑚砂长期排水循环加载的轴向残余累积变形显式预测模型。不同于传统模型参数由拟合得到造成参数物理意义不明确的特点, 本文提出的显式模型参数物理含义明确, 同时参数少, 便于确定, 对预测循环荷载下珊瑚砂地基长期沉降有积极意义。

参 考 文 献:

- [1] 王刚, 查京京, 魏星. 循环三轴应力路径下钙质砂颗粒破碎演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019; 1–6. (WANG Gang, CHA Jing-jing, WEI Xing. Evolution of particle crushing of carbonate sand under cyclic triaxial stress path[J]. Chinese Journal of Geotechnical, 2019; 1–6. (in Chinese))
- [2] HARDIN B O. Crushing of soil particles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(10): 1177–1192.
- [3] SADREKARIMI A, OLSON S M. Particle damage observed in ring shear tests on sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(5): 497–515.
- [4] 王磊. 福建标准砂加筋硬化与循环累积变形三轴试验及本构模型[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (WANG Lei. Triaxial testing and constitutive modeling for fiber reinforcement and cyclic accumulative strain of Fujian sands[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese))
- [5] 何绍衡, 郑晴晴, 夏唐代, 等. 考虑时间间歇效应的地铁列车荷载下海相软土长期动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 353–364. (HE Shao-heng, ZHENG Qing-qing, XIA Tang-dai, et al. Experimental study on long-term dynamic characteristics of marine soft soils under metro train loads considering time intermittent effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 353–364. (in Chinese))
- [6] 伍婷玉, 郭林, 蔡袁强, 等. 交通荷载应力路径下 K_0 固结软黏土变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 859–867. (WU Ting-yu, GUO Lin, CAI Yuan-qiang, et al. Deformation behavior of K_0 -consolidated soft clay under traffic load-induced stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 859–867. (in Chinese))
- [7] 姚兆明, 黄茂松. 循环荷载下饱和软黏土的累积变形显式模型[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 325–331. (YAO Zhao-ming, HUANG Mao-song. Explicit model for cumulative strain of saturated clay subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 325–331. (in Chinese))

(责编: 胡海霞)